Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 5833F

Essais de déglaçage dans le port de Thunder Bay Hiver 1984

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

par
Arctec Canada Limited

JANVIER 1985

Canada

CA1
DTC 845
85
I15SZ
c.2

TP 5833F

ESSAIS DE DÉGLAÇAGE DANS LE PORT DE THUNDER BAY
HIVER 1984

Library and Information Centre / Centre de documentation (GBLAC)
RECEIVED / REÇU LE
OCT 24 1986
Transport Canada / Transports Canada

par

R. Abdelnour
D. Howard
M. Perchanok

Arctec Canada Limited

Janvier 1985

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles du contractant et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "Ice Management in Thunder Bay Harbour - Winter 1984", TP 5833E.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche était composée entre autres de:

Messieurs R. Abdelnour
M. Perchanok
D. Howard
H. Blount

Transports Canada / Transport Canada
Développement / Development

FORMULE DOCUMENTAIRE DU RAPPORT

1. Nº du rapport Transports Canada	2. Nº de l'étude — CDT	3. Nº de catalogue du destinataire
TP 5833F	6115	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Essais de déglaçage dans le port de Thunder Bay Hiver 1984	Janvier 1985
	6. Nº du rapport de l'organisme exécutant SR1371C
7. Auteur(s)	8. Nº de dossier Transports Canada
R. Abdelnour, D. Howard, M. Perchanok	D 1460-145-2-7
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant Arctec Canada Limited 311 Legget Drive Kanata, Ontario K2K 1Z8	10. Nº de dossier — ASC 11SD.T82000-3-3560
	11. Nº de contrat — ASC ou Transports Canada 0SD83-00186
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy-Favreau, 200 ouest, boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal, Québec H2Z 1X4	13. Genre de rapport et période visée Sommaire
	14. Code de l'organisme parrain CDT 6115
15. Remarques additionnelles Sommaire de "Ice Management in Thunder Bay Harbour - Winter 1984, Vol.I-Cannon Bubbler Experiments, Vol.II-Manitoba Pool #1 Dock Load Experiment", TP 5834E, TP 5835E.	16. Agent de projet — CDT R.S. Nishizaki

17. Résumé

Ce rapport rend compte des résultats d'un programme de recherche sur la maîtrise des glaces; composé de deux volets, il a été mené dans le port de Thunder Bay, au cours de l'hiver 1984.

Le premier volet concernait l'évaluation d'un ensemble de 10 mélangeurs à canon pneumatique utilisés pour faire fondre la glace. Les chercheurs ont mesuré les débits d'air, la température de l'eau, l'épaisseur de la glace, la superficie de la zone déglacée, la vitesse de déglaçage, et ont observé les mécanismes de la fonte de la glace. Ce système s'est révélé plus rapide et plus efficace que les autres systèmes mis en oeuvre à Thunder Bay, en plus d'être plus économique. A remarquer que la température initiale de l'eau dans le bassin n'a pas ralenti l'action des mélangeurs essayés.

Le deuxième volet intéressait la mesure des forces exercées par les glaces sur les parois d'un bassin de chargement au cours d'opérations de déglaçage par un brise-glace couplé ou non à une plate-forme à coussin d'air. Agissant seul dans une glace uniforme intacte au départ, le brise-glace a induit une force maximum dépassant 184 kN/m, alors que cette force ne dépassait pas 178 kN/m lorsque le brise-glace était couplé à la plate-forme à coussin d'air. Conclusion: les brise-glace ne devraient jamais procéder seuls au déglaçage des bassins portuaires, le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air ayant fait la preuve de son efficacité.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Maîtrise des glaces, déglaçage, ports, quais, bassins portuaires, mélangeur à canon pneumatique, véhicule à coussin d'air, proue, essais.	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	45	-

CDT/TDC 79-005
Rev 86

Canada

Transport Canada / Transports Canada

Development / Développement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 5833F	6115	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Essais de déglaçage dans le port de Thunder Bay Hiver 1984	January 1985
	6. Performing Organization Report No. SR1371C

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
R. Abdelnour, D. Howard, M. Perchanok	D 1460-145-2-7

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Arctec Canada Limited 311 Legget Drive Kanata, Ontario K2K 1Z8	11SD.T82000-3-3560
	11. DSS or Transport Canada Contract No. 0SD83-00186

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary
	14. Sponsoring Agency Code TDC 6115

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary of "Ice Management in Thunder Bay Harbour - Winter 1984, vol. I-Cannon Bubbler Experiments, Vol. II-Manitoba Pool #1 Dock Load Experiment", TP 5834E, TP5835E.	R.S. Nishizaki

17. Abstract

This report describes the results of a research program carried out in Thunder Bay Harbour during winter 1984. The program consisted of two separate experiments.

The first experiment evaluated the use of an air cannon bubbler system for ice suppression. Air and water temperatures, ice thickness and ice cover area, and ice melting mechanisms were monitored along with the rate of ice clearing using a 10-unit air cannon bubbler system. The air cannon system was faster and more efficient at melting ice than other systems at Thunder Bay. It was also more economical. The rate of ice melting by the cannon bubbler system was not limited by the initial water temperature in the slip.

The second experiment measured and compared forces exerted on a dock wall by an ice-breaking vessel entering a slip with an intact level ice sheet and by the vessel when fitted with an air cushion icebreaking bow (ACIB). Ice forces exceeded 184 kN/m with the icebreaker alone, while a maximum force of 178 kN/m was recorded with the ship and ACIB combination. It was concluded that while the icebreaker alone should not be used to clear intact ice in the slip, the ACIB/icebreaker combination can result in an effective system.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Ice control, icebreaking, management, ports, harbours, docks, slips, air cannon bubbler, air cushion vehicle, bow, tests, trials.	Limited number of copies available from Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	45	-

TDC: CDT 79-005
Rev 86

Canada

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier le Centre de développement des transports, la Commission du port Lakehead, M. J. Hill, ingénieur au port, M. Roy Nishizaki, le capitaine du brise-glace ALEXANDER HENRY de la Garde côtière canadienne et son équipage, le Bureau météorologique de Thunder Bay, la municipalité de Thunder Bay (notamment, M. R. Romanek), la société V.B. Cook Co. Ltd., ainsi que le personnel des silos à grain de la Canada Malting, de la Manitoba Pool et de la United Grain Growers. Leurs conseils et leur collaboration ont été grandement appréciés.

AVANT-PROPOS

Ces dernières années, Transports Canada a consacré beaucoup d'efforts à la recherche d'un système de déglaçage qui permettrait de garantir une date fixe d'ouverture du port de Thunder Bay au printemps.

La reprise annuelle des activités portuaires est souhaitée pour le premier avril. Les efforts déployés dans ce sens ont porté notamment sur la mise au point d'une plate-forme à coussin d'air visant à augmenter l'efficacité d'un brise-glace, la mise à l'épreuve de divers types de diffuseurs d'air classiques puis d'un mélangeur à canon pneumatique conçu par la société Atara Corporation, le contrôle de la température de l'eau de plusieurs des bassins ainsi que sur l'inventaire et l'évaluation des divers moyens de déglaçage possibles.

Le présent rapport rend compte des résultats d'un programme de recherche sur la maîtrise des glaces mené dans le port de Thunder Bay. Ce programme comprenait deux volets, le premier concernant l'évaluation de mélangeurs à canon pneumatique Atara [1], et le deuxième, la mesure des forces exercées par les glaces sur les parois des bassins au cours d'opérations de déglaçage par un brise-glace avançant dans une glace uniforme intacte au départ [2].

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. OBJECTIFS 4

3. PROGRAMME D'ESSAI 5
   3.1 Essai des mélangeurs à canon pneumatique 6
   3.2 Mesure de la poussée des glaces 11

4. RÉSULTATS 16
   4.1 Essai des mélangeurs à canon pneumatique 16
   4.2 Mesure de la poussée des glaces 22

5. CONCLUSIONS 30
   5.1 Mélangeurs à canon pneumatique 30
   5.2 Poussée des glaces 30

6. RECOMMANDATIONS 32
   6.1 Mélangeurs à canon pneumatique 32
   6.2 Poussée des glaces 32

7. RÉFÉRENCES 34

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

Figure 1.1	Port de Thunder Bay	3
Figure 3.1	Schéma de principe d'un diffuseur d'air	7
Figure 3.2	Installation typique d'un mélangeur à canon pneumatique de modèle Atara	9
Figure 3.3	Disposition des instruments de mesure au bassin desservant la Canada Malting et la Saskatchewan Pool	10
Figure 3.4	Disposition des capteurs de pression pour les essais numéros 1 et 2	13
Figure 3.5	Système de saisie des données	14
Figure 3.6	Disposition des capteurs de pression pour l'essai n° 3	15
Figure 4.1	Paramètres du milieu	17
Figure 4.2	Variations de la température de l'eau du bassin desservant la Canada Malting	18
Figure 4.3	Potentiel thermique de l'eau du bassin	19
Figure 4.4	Comparaison de la superficie déglaçée par les trois systèmes essayés dans le port de Thunder Bay en mars 1984	21
Figure 4.5	Répartition des forces exercées par les glaces	25
Figure 4.6	Répartition des forces exercées par les glaces	25
Figure 4.7	Répartition des forces exercées par les glaces	25
Figure 4.8	Répartition des forces exercées par les glaces	26
Figure 4.9	Répartition des forces exercées par les glaces	26
Figure 4.10	Répartition des forces exercées par les glaces	26
Figure 4.11	Variations de pression en fonction des variations thermiques de la glace	29
Tableau 4.1	Résultats des essais visant à mesurer les forces exercées par les glaces	24

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, Transports Canada a consacré beaucoup d'efforts à la recherche d'un système de déglaçage qui permettrait de garantir une date fixe de reprise des activités portuaires au printemps à Thunder Bay.

Thunder Bay, situé sur la rive nord-ouest du lac Supérieur (voir figure 1.1), est le port le plus au nord de la Voie maritime du Saint-Laurent. Les eaux commencent à geler au début du mois de décembre et la glace peut atteindre une épaisseur moyenne de 0,75 m au plus froid de l'hiver. Le dégel se produit généralement au cours des deux dernières semaines du mois d'avril. Dans les trente dernières années, la date de reprise des activités du port, largement influencée par la rigueur de l'hiver et les moyens de déglaçage mis en oeuvre, a varié entre le 25 mars et le 20 avril.

L'augmentation du tonnage qui y est manutentionné, et qui est passé de 12 millions en 1977 à environ 20 millions en 1984, constitue une forte incitation à augmenter la capacité du port. Une des façons d'y arriver serait de garantir l'ouverture du port à une date fixe au printemps. Il serait alors plus facile d'établir un calendrier des activités et l'efficacité globale du port s'en trouverait forcément accrue.

Les techniques auxquelles on a eu recours jusqu'à maintenant pour briser les glaces dans le port, en dehors des bassins de chargement, se sont avérées assez efficaces. On a utilisé notamment le brise-glace ALEXANDER HENRY de la Garde côtière canadienne. Une fois brisée, la glace est poussée au loin par les vents du nord et du nord-ouest. Récemment, on a réussi à augmenter considérablement l'efficacité du brise-glace dans une glace uniforme en le couplant à une plate-forme à coussin d'air.

Plusieurs études ont été effectuées pour tâcher de résoudre le problème de l'accès aux bassins de chargement alors que la glace est encore pratiquement intacte.

Les principales recherches menées dans le port de Thunder Bay ont porté notamment sur: la mise au point d'une plate-forme à coussin d'air destinée à améliorer l'efficacité d'un brise-glace; la mise à l'épreuve de divers types de diffuseurs d'air classiques (Hill [3], Kamo et autres [4, 5]) puis d'un mélangeur à canon pneumatique conçu par la société Atara Corporation [6]; le contrôle de la température

de l'eau de plusieurs des bassins de chargement [7]; sur l'inventaire [8] et l'évaluation [9] des divers moyens de déglaçage possibles.

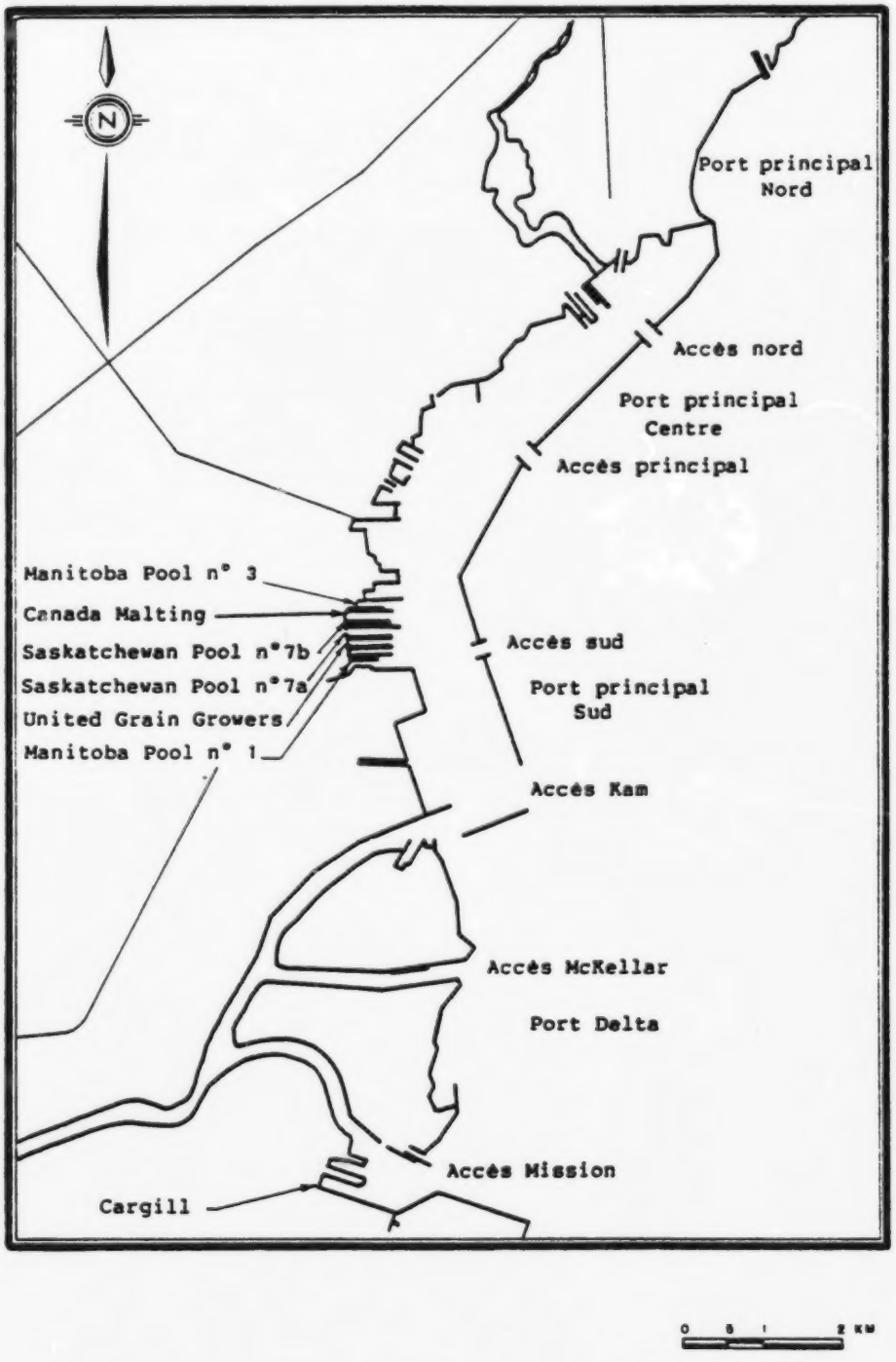


Figure 1.1 Port de Thunder Bay

2. OBJECTIFS

Le programme de recherche sur la maîtrise des glaces mené dans le port de Thunder Bay avait pour but ultime de permettre l'ouverture de ce port dès le 1er avril.

Les essais effectués dans le cadre de ce programme visaient à:

1. évaluer l'efficacité d'une batterie de mélangeurs à canon pneumatique munis de déflecteurs utilisés pour faire fondre la glace dans un des bassins de chargement du port de Thunder Bay et à comparer les résultats obtenus avec ceux des autres systèmes mis en oeuvre dans le même port;

2. mesurer les forces exercées par les glaces sur les fondations d'un silo à grain et le mouvement de ce dernier lorsqu'un brise-glace pénètre dans le bassin. La valeur mesurée des forces devait être comparée en direct à la valeur admissible théorique pour s'assurer qu'elle ne dépassait pas 20 p. 100 de cette dernière.

3. PROGRAMME D'ESSAI

Les essais effectués dans le port de Thunder Bay en février et mars 1984 avaient deux objets distincts. Le premier concernait la mise en oeuvre et le contrôle de dix mélangeurs à canon pneumatique. Il a été effectué entre le 9 et le 21 mars dans le bassin de chargement desservant la Canada Malting et la Saskatchewan Pool.

Il s'agissait d'essayer les mélangeurs sous divers régimes d'alimentation en air et avec plusieurs types de déflecteurs, ainsi que de contrôler les paramètres du milieu et la vitesse de déglaçage.

On a, d'autre part, mesuré les forces exercées par les glaces sur les parois du bassin desservant la United Grain Growers et la Manitoba Pool. Un des quais et les silos à grain ont été instrumentés pour mesurer la pression exercée par les glaces et le mouvement subi par les structures.

Les opérations de déglaçage ont été effectuées avec le brise-glace ALEXANDER HENRY utilisé seul, puis couplé à une plate-forme à coussin d'air. Ce brise-glace présente une proue de forme classique qui déplace les glaces latéralement plutôt que de les enfoncer dans l'eau sous son poids. Cependant, couplé à une plate-forme à coussin d'air, il agit différemment et engendre des forces horizontales sensiblement moins grandes.

Le premier essai s'est fait avec le brise-glace seul. Pour s'approcher du bassin de déchargement, celui-ci devait charger une couche de glace d'environ 0,70 m d'épaisseur. L'essai a dû être abandonné alors que le brise-glace était rendu à environ 50 m de l'entrée du bassin à cause des forces sans cesse croissantes que les glaces exerçaient sur les quais.

Le deuxième essai a été effectué avec le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air. Les forces exercées par les glaces étant moins importantes que lors de l'essai précédent, le brise-glace a pu pénétrer jusqu'à environ 20 m dans le bassin. On a dû interrompre l'essai encore une fois, la plate-forme ne réussissant pas à briser les glaces, plus épaisses à l'intérieur du bassin.

Un dernier essai a été tenté trois jours plus tard avec le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air. Cette fois, les capteurs de pression ont été répartis sur une plus

grande longueur du quai afin de mesurer la poussée des glaces lorsque le brise-glace pénètre jusqu'au fond du bassin.

3.1 Essai des mélangeurs à canon pneumatique

Principes

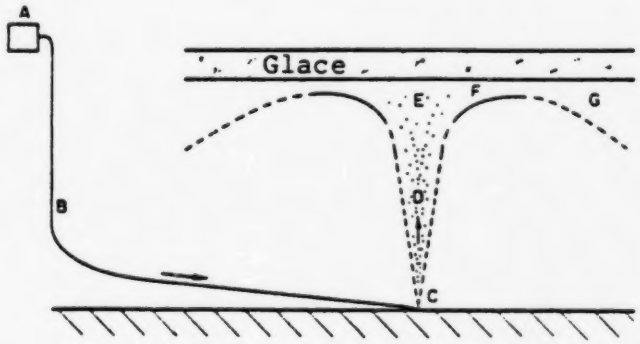
La figure 3.1 [10] présente un schéma de principe de diffuseur d'air à décharge ponctuelle. Les bulles d'air sortent au point C et montent en panache. En s'étendant, celui-ci augmente le rayon d'action du courant d'eau entraînée (D). À la surface, les bulles et l'eau entraînée se dispersent dans toutes les directions, créant un phénomène de convection qui assure un courant constant d'eau relativement chaude vers la surface (E, F, G). Ashton a mis au point pour ce type de diffuseur d'air un modèle théorique permettant de calculer, pour une profondeur de décharge et un débit d'air donnés, la vitesse d'écoulement dans l'axe du panache, le débit d'eau entraînée et le rayon d'action du courant d'eau entraînée à la surface.

Le type de mélangeur utilisé pour notre expérimentation diffère en deux points du diffuseur classique décrit ci-dessus. D'une part, l'air est injecté par un accumulateur, par coups périodiques, de manière à former une seule grosse bulle plutôt qu'une multitude de petites bulles. D'autre part, les bulles sont acheminées dans un tube, ou canon, qui les empêche de se diviser et de monter en panache. Chaque grosse bulle agit à la manière d'un piston pour faire sortir la colonne d'eau contenue dans le tube.

Il n'existe pas de modèle théorique pour les mélangeurs à canon pneumatique. Cependant, des essais en laboratoire et certains calculs [11] permettent de croire que, pour le déglaçage, ils seraient plus efficaces que tous les autres types de diffuseurs considérés.

Parmi les principes qui expliqueraient la supériorité du mélangeur à canon sur les autres types de diffuseurs, on peut évoquer:

- une vitesse de montée à la surface relativement grande, attribuable au plus grand diamètre de la bulle;
- un entraînement d'eau plus efficace que celui provoqué par le panache de bulles des diffuseurs classiques;



(Selon Ashton [10])

A - Compresseur
B - Canalisation d'alimentation en air
C - Tuyau diffuseur
D - Panache d'eau entraînée
E - Épanouissement du panache sous la couche de glace
F - Zone d'écoulement horizontal de l'eau entraînée
G - Dispersion de l'eau entraînée

Figure 3.1 Schéma de principe d'un diffuseur d'air

- l'optimisation de l'énergie consommée grâce à l'emploi d'un déflecteur pour diriger l'écoulement dans le sens horizontal; et

- un coefficient de transfert de chaleur plus élevé, en raison d'une plus grande vitesse d'écoulement et d'un nombre de Reynolds plus élevé.

Instrumentation

Les principales opérations reliées à l'essai des mélangeurs comprenaient la mise en place des appareils et des thermistances, le mesurage de l'épaisseur et le contrôle de la température de la glace ainsi que la prise de photographies aériennes permettant de déterminer la superficie de la zone déglacée.

Le modèle de mélangeur qu'il s'agissait d'essayer est un appareil à canon pneumatique construit par la société Atara Corporation. On peut en voir une illustration schématique à la figure 3.2. Les mélangeurs étaient équipés d'un déflecteur en forme soit de cône, soit de coude avec ou sans chicane intérieure.

Les essais ont porté sur une batterie de dix mélangeurs, dont sept ont été placés le long de la paroi nord et trois au centre du bassin. L'emplacement des mélangeurs et des thermistances est indiqué sur la figure 3.3.

Pour la mise en place des mélangeurs, il a fallu découper dans la glace des trous de 1,20 m de côté, puis faire descendre les appareils au fond, après les avoir lestés au moyen d'une plaque en acier.

Les mélangeurs ont été alimentés par un ventilateur d'une puissance de 20 Hp, alimenté en 575 volts, auquel ils étaient reliés par un tuyau souple. Le ventilateur fournissait une pression de 76 kPa (11 lb/po^2) et un débit d'alimentation de 0,132 m^3/s (280 pieds cubes standard par minute), soit 0,0132 m^3/s par mélangeur; il a fonctionné depuis le matin du 9 jusqu'au 22 mars 1984.

La température de l'eau et de l'air a été contrôlée au moyen de huit groupes de trois ou quatre thermistances placés comme il est indiqué sur la figure 3.3. Les indications des thermistances ont été enregistrées aux demi-heures du 8 au 10 mars, puis aux deux heures jusqu'au 23 mars. Les données ont été enregistrées directement sur disquettes souples au moyen d'un équipement de saisie de données transportable.

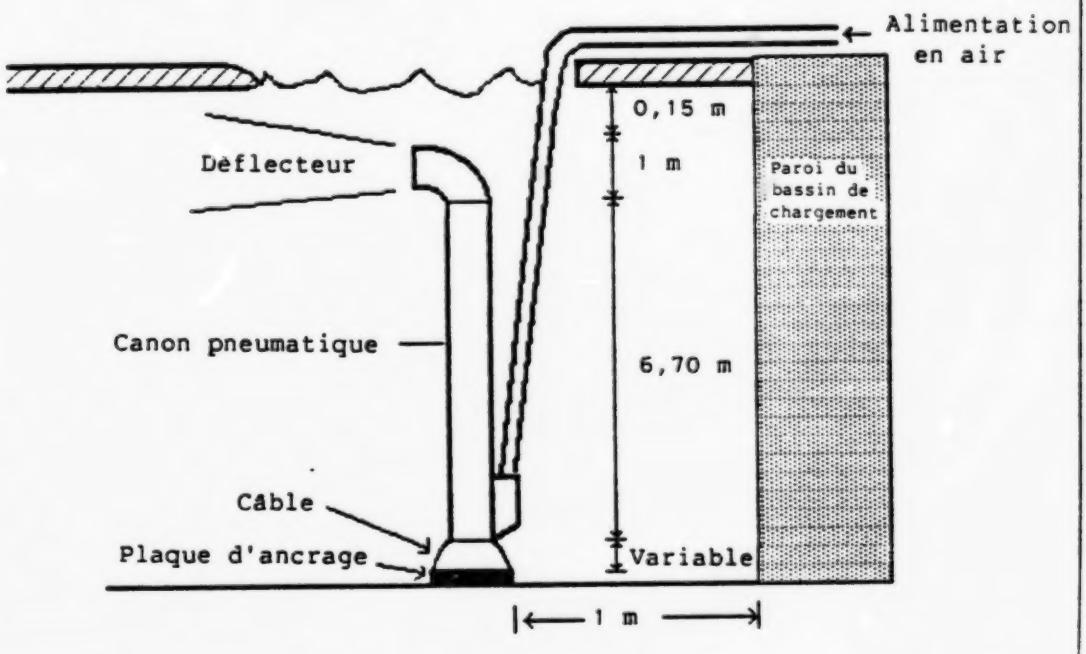


Figure 3.2 Installation typique d'un mélangeur à canon pneumatique de modèle Atara

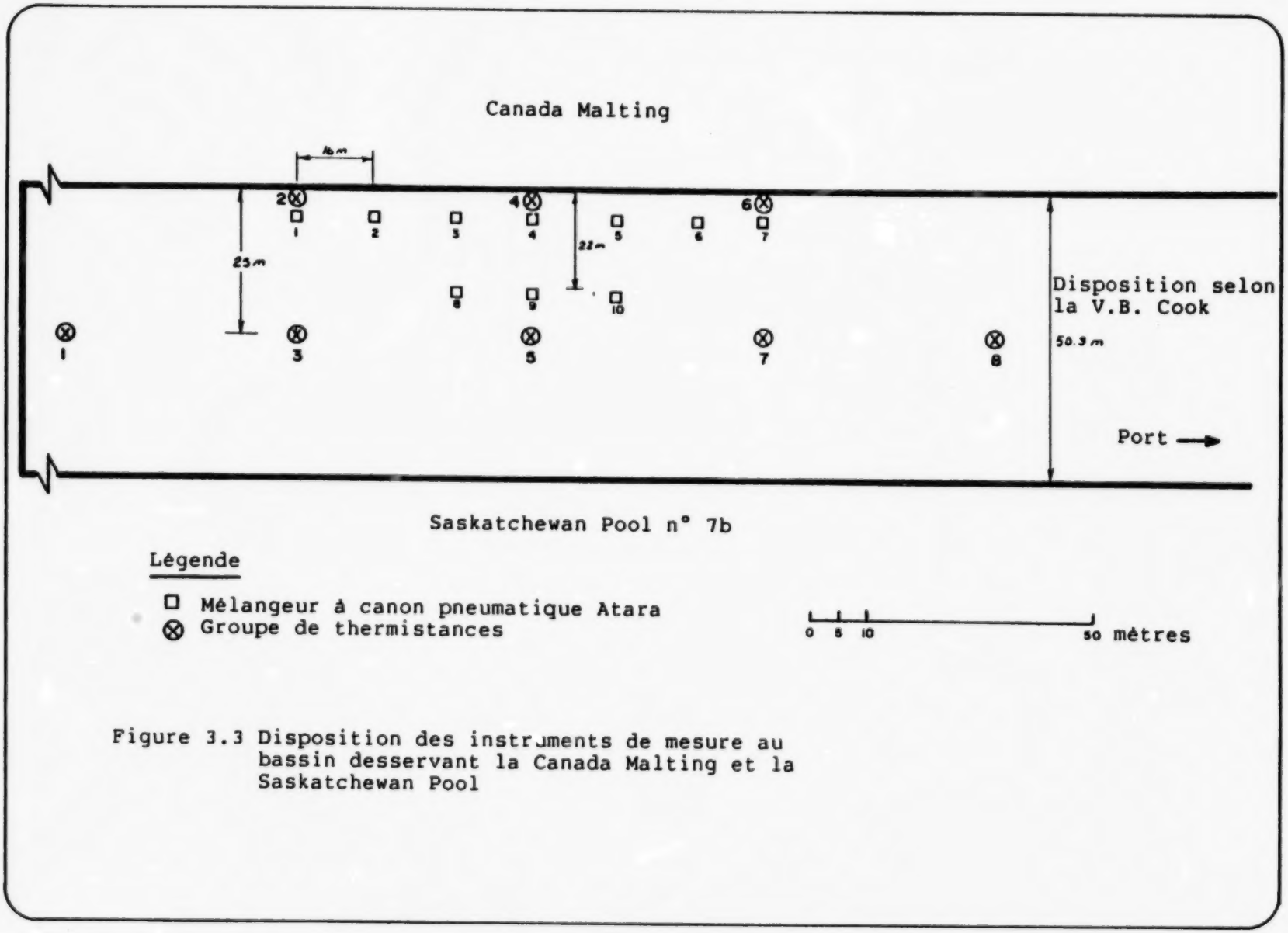


Figure 3.3 Disposition des instruments de mesure au bassin desservant la Canada Malting et la Saskatchewan Pool

La vitesse de déglaçage a été contrôlée par mesurage de l'épaisseur de la glace le 8 mars, puis par photographies aériennes prises à 9 h les 9, 12, 14, 16, 19, 21, 23 et 26 mars.

La température de la glace a été contrôlée dans un bassin voisin de celui desservant la Canada Malting, mais les données recueillies s'appliquent tout autant au bassin en cause.

3.2 Mesure de la poussée des glaces

Opérations préalables

Avant de procéder aux essais, on a estimé les charges maximums (parallèle et perpendiculaire) des glaces que les fondations et structures du quai pourraient supporter sans dommage. On a obtenu une valeur de 365 kN/m, pour une charge exercée dans les deux sens, à peu près au milieu du quai.

La poussée des glaces sur le quai au moment où le brise-glace entre dans le bassin a été estimée à l'aide d'un modèle mathématique à éléments finis. Les valeurs de calcul estimatives utilisées correspondaient au cas le plus défavorable. Premièrement, on a supposé que le brise-glace serait utilisé seul, la poussée des glaces étant alors plus forte que s'il était couplé à une plate-forme à coussin d'air. Deuxièmement, on a supposé que l'épaisseur de la glace était de 1 m, alors qu'en réalité, on la croyait plus mince. Enfin, on a fait les calculs pour une structure infiniment rigide, puis pour une structure ayant une constante d'élasticité de 0,7 mm/kN. La charge maximum obtenue a été de 87,8 kN/m dans le premier cas et de 3,0 kN/m dans l'autre. On s'attendait à ce que les charges mesurées se situent entre ces deux valeurs.

L'accélération de la structure sous le choc du brise-glace contre les glaces a également été estimé à l'aide d'un modèle mathématique à éléments finis. Pour simplifier le problème, on a limité les calculs au cas du silo à grain. Dans le pire cas envisagé, on supposait que le brise-glace venait heurter le coin du quai à une vitesse de 5 noeuds. La valeur maximale de l'accélération obtenue a été de 1,50 m/s^2 ou 0,15 g.

Instrumentation

Cinq capteurs de pression Hexpack*, dont deux donnent la moyenne des forces exercées dans les deux sens et trois la valeur des forces considérées séparément, ont été utilisés pour mesurer la poussée des glaces. Ils ont été scellés dans des rainures pratiquées dans la glace. La disposition des capteurs de pression pour le premier et le deuxième essai est indiquée sur la figure 3.4. Deux groupes de trois thermistances ont été mis en place de la même façon, les éléments étant placés à 0,15 m du fond, au milieu et à 0,15 m du dessus de la couche de glace. Un accéléromètre et une caméra vidéo ont été montés à une hauteur d'environ 35 m au-dessus du quai; une attention particulière a été apportée à l'installation de l'accéléromètre afin que son axe soit perpendiculaire au quai.

La figure 3.5 représente le système de saisie des données utilisé pour ces essais. Les quatorze canaux affectés aux capteurs de pression étaient soumis à deux conditionneurs de signaux extensométriques Vishay 2110. Les signaux émis par l'accéléromètre et les capteurs de pression ont été enregistrés à la fois sous forme numérique et sous forme analogique.

Pour le troisième essai, les capteurs de pression ont été placés comme l'indique la figure 3.6. Sauf pour le déplacement des capteurs de pression, l'installation d'un deuxième accéléromètre sur le silo de la United Grain Growers et le rètrait d'un des deux groupes de thermistances, la chaîne de mesure est restée la même que lors des essais précédents.

---

* Les Hexpacks sont des capteurs de pression pour les glaces conçus par ARCTEC CANADA.

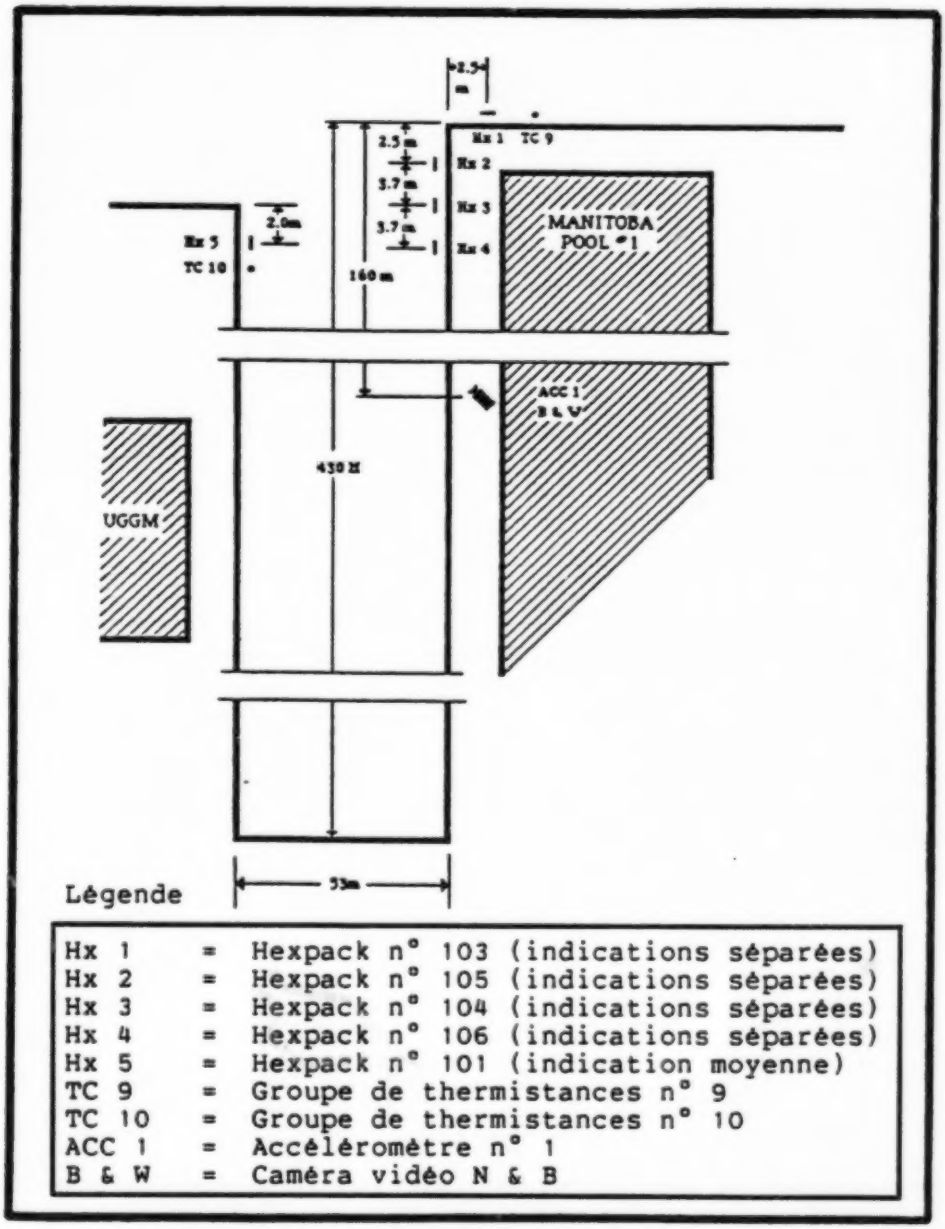


Figure 3.4 Disposition des capteurs de pression pour les essais numéros 1 et 2

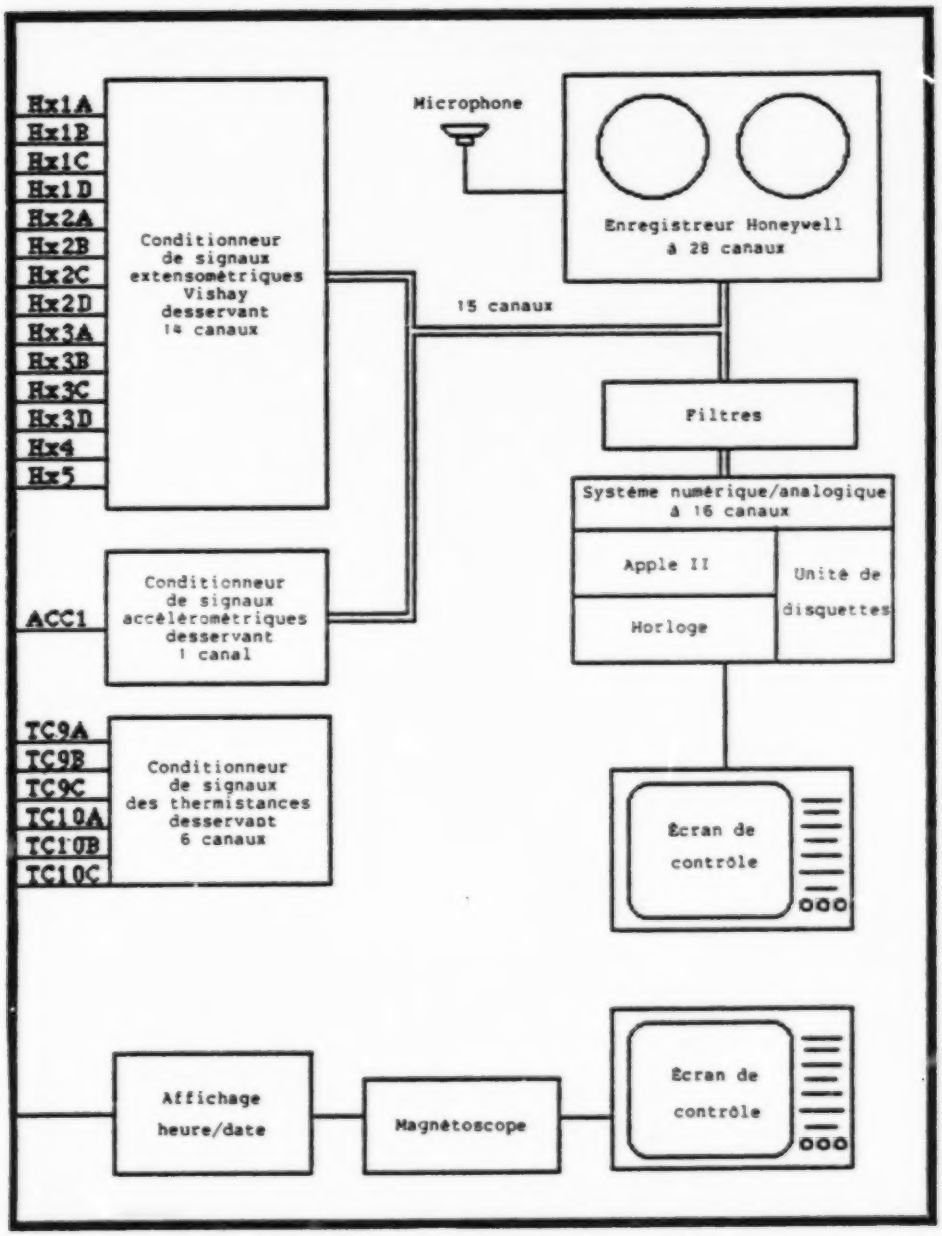
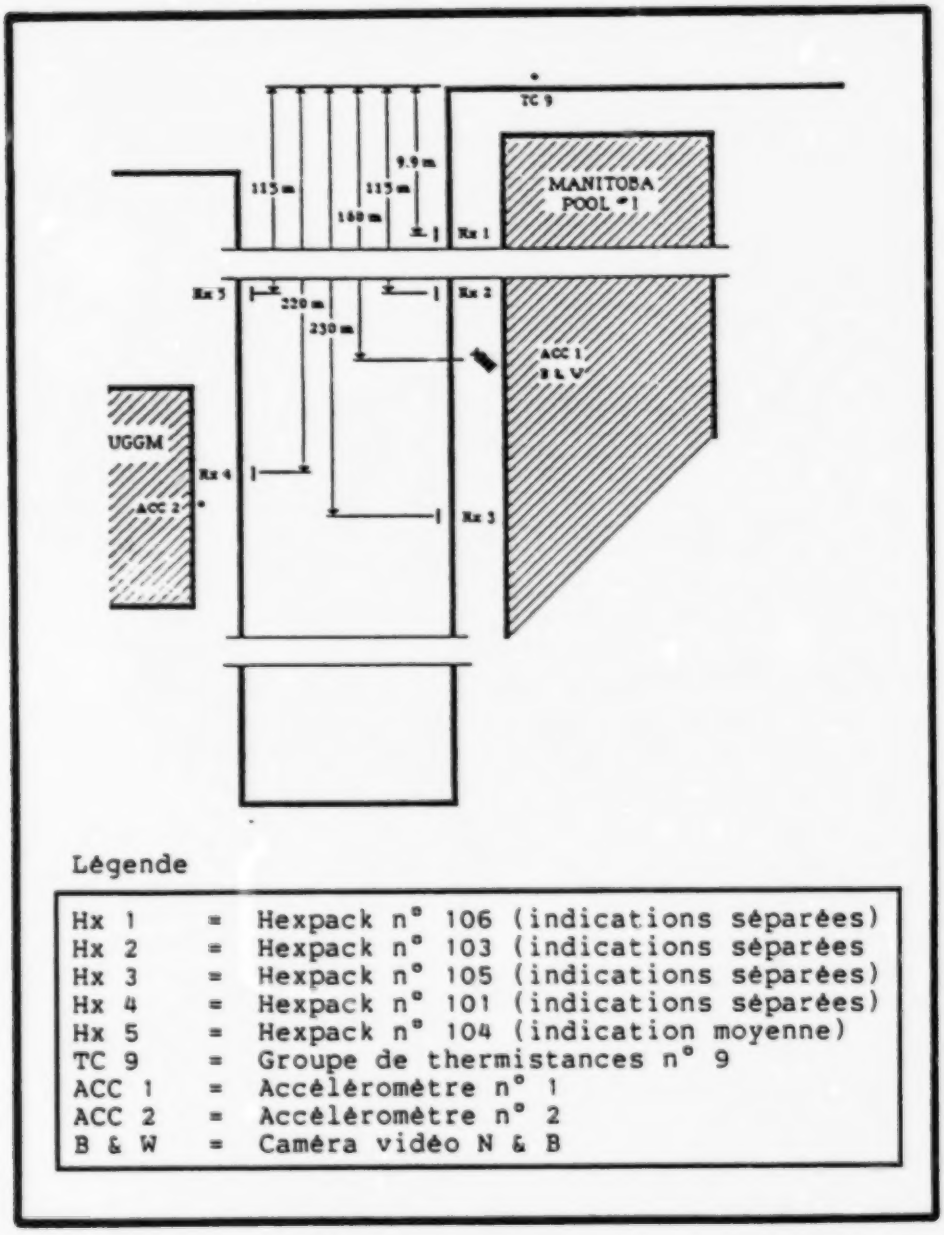


Figure 3.5 Système de saisie des données



Légende

Hx 1	=	Hexpack n° 106 (indications séparées)
Hx 2	=	Hexpack n° 103 (indications séparées
Hx 3	=	Hexpack n° 105 (indications séparées)
Hx 4	=	Hexpack n° 101 (indications séparées)
Hx 5	=	Hexpack n° 104 (indication moyenne)
TC 9	=	Groupe de thermistances n° 9
ACC 1	=	Accéléromètre n° 1
ACC 2	=	Accéléromètre n° 2
B & W	=	Caméra vidéo N & B

Figure 3.6 Disposition des capteurs de pression pour l'essai n° 3

4. RÉSULTATS

4.1 Essai des mélangeurs à canon pneumatique

Critères d'évaluation

Le contrôle de la température de l'eau et de la superficie des zones déglacées au cours de l'essai a permis d'évaluer l'efficacité des mélangeurs à canon pneumatique d'après les facteurs suivants:

1) effet des mélangeurs sur la température et la circulation de l'eau;

2) potentiel thermique de l'eau du bassin;

3) effet des déflecteurs sur l'écoulement horizontal de l'eau; et

4) vitesse de déglaçage.

Température de l'eau

L'évolution des divers paramètres du milieu, enregistrés au cours de l'essai, est présentée sous forme graphique à la figure 4.1. Les données relatives à la vitesse du vent, au nombre d'heures d'ensoleillement et à la température de l'air ont été fournies par l'aéroport de Thunder Bay. Celles concernant la température de l'eau provennaient du groupe de thermistances n° 2.

À cet endroit, le mélangeur a visiblement réalisé un brassage complet de l'eau dès la première journée. Le même effet a pu être constaté à chaque point d'essai, mais non au groupe de thermistances n° 1 (figure 4.2). La température moyenne de l'eau aux divers points d'essai a baissé de 1,12 °C à 1,07 °C le premier jour, puis elle est remontée à 1,33 °C avant la fin de l'essai.

Potentiel thermique de l'eau du bassin

Le potentiel thermique de l'eau du bassin est comparé à l'énergie thermique requise pour faire fondre la couche de glace et à celle mise en oeuvre au cours de l'essai (figure 4.3). Avant les essais de 1984, le potentiel thermique de l'eau du bassin était suffisant pour faire fondre environ 17 p. 100 de la couche de glace qui la recouvrait (comparé à 10 p. 100 en 1983 [7]), en supposant que la température de la glace était de 0 °C et qu'il n'y

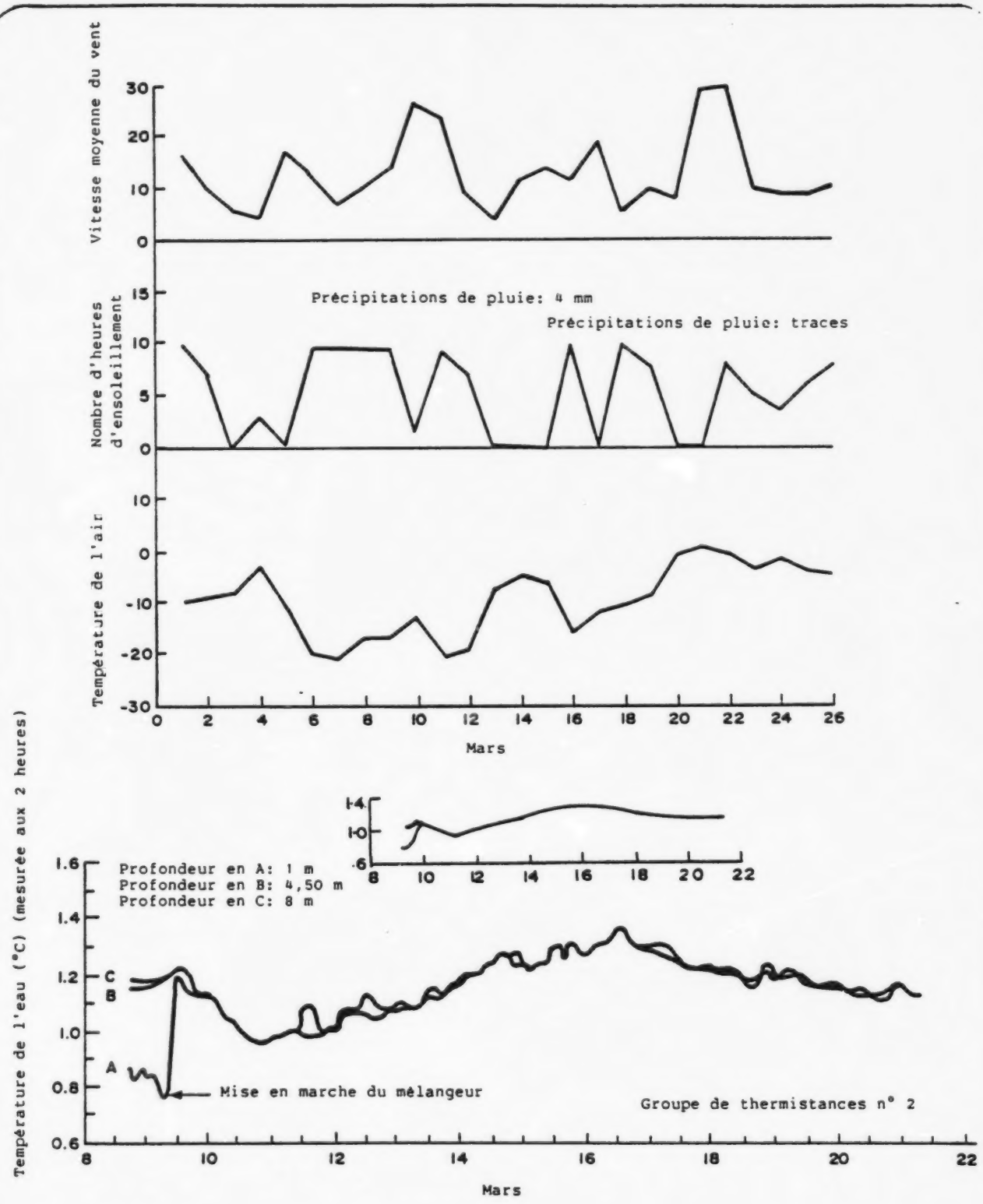


Figure 4.1 Paramètres du milieu

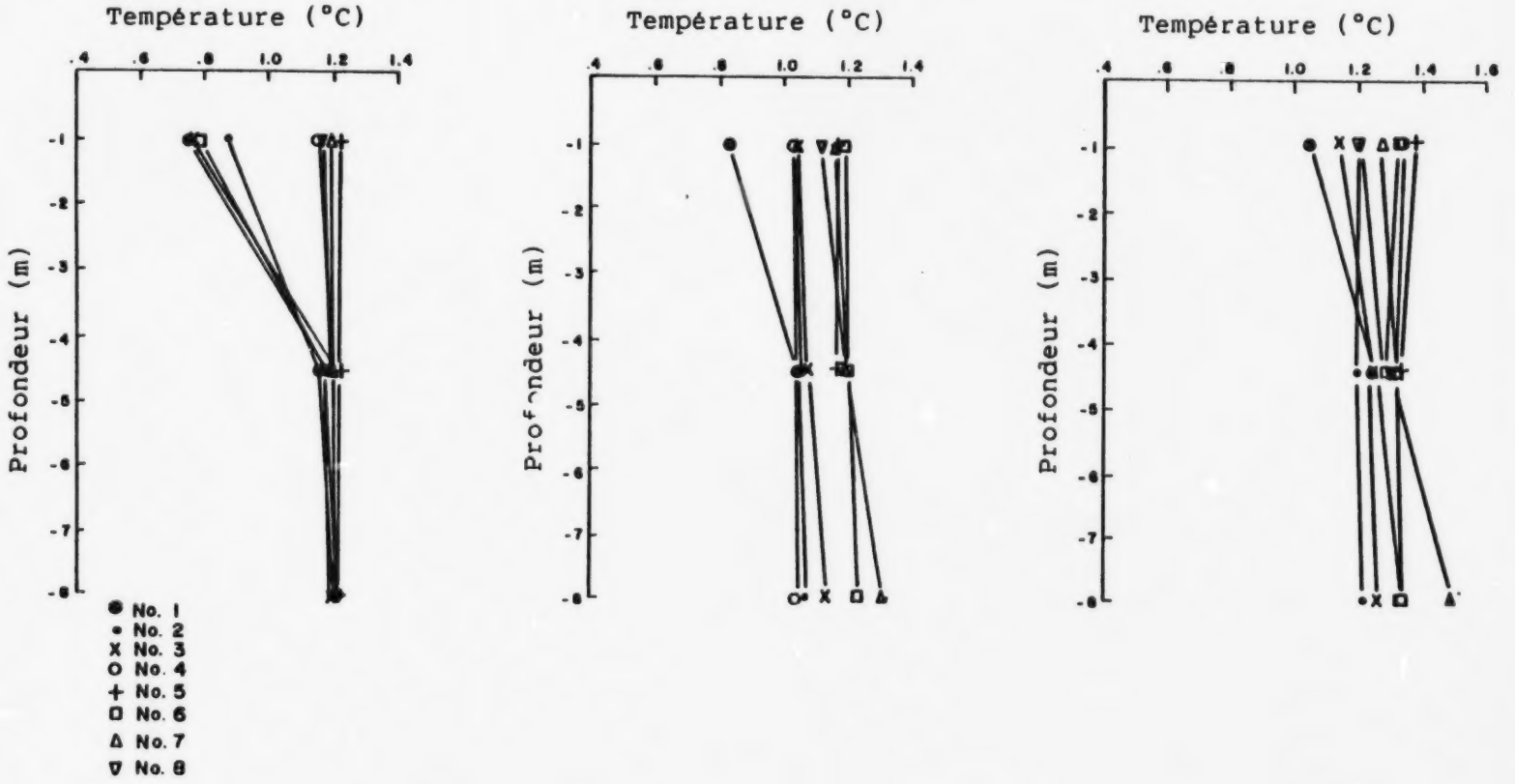
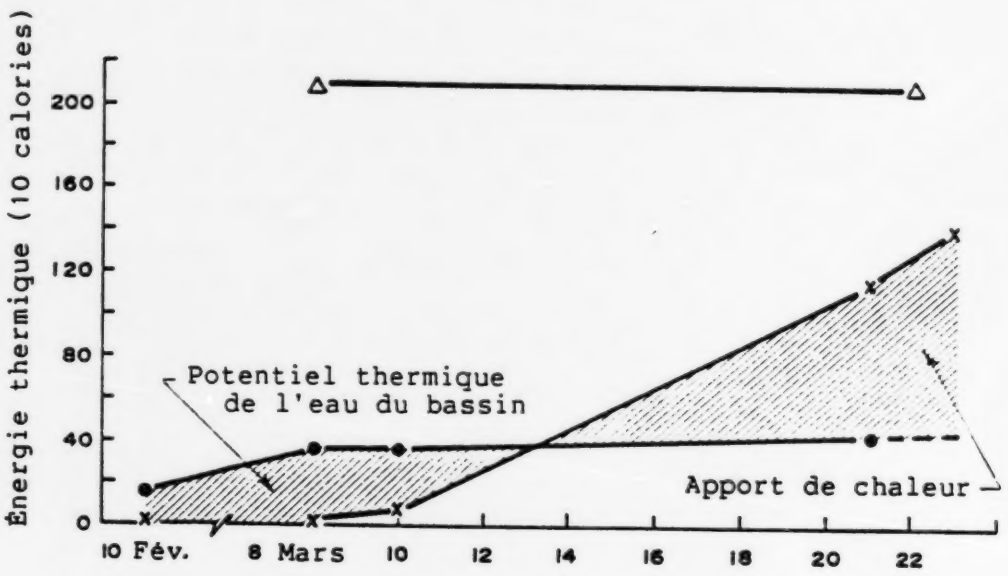


Figure 4.2 Variations de la température de l'eau du bassin desservant la Canada Malting



● Potentiel thermique de l'eau du bassin

△ Énergie thermique requise pour faire fondre toute la glace de la zone d'essai

x Énergie thermique employée

Figure 4.3 Potentiel thermique de l'eau du bassin

avait aucune perte de chaleur dans l'atmosphère. La figure 4.3 montre qu'il a dû y avoir un apport de chaleur de l'extérieur du bassin pour expliquer le pourcentage de fonte constaté. Cette chaleur a pu être apportée par des courants d'eau venant du port ou par des eaux de ruissellement provenant du silo de la Saskatchewan Pool ou encore, être le fait du rayonnement solaire.

Effet des déflecteurs sur l'écoulement horizontal

Des calculs théoriques et des essais en laboratoire ont indiqué que les mélangeurs à canon pneumatique avec déflecteur créent un plus grand écoulement horizontal que les mêmes mélangeurs sans déflecteur et les diffuseurs d'air classiques. Les essais in situ ont confirmé le fait.

D'abord, on a constaté un amincissement de la couche de glace jusqu'à deux mètres du bord des trous pratiqués pour la mise en place des mélangeurs. Bien que les règles de la sécurité interdisaient le mesurage périodique du rayon des zones déglacées, on a pu constater visuellement qu'il y avait réellement eu écoulement horizontal.

Ensuite, on a enregistré des augmentations de la température de l'eau à 48 m des mélangeurs. Le phénomène pourrait être attribué à l'écoulement horizontal de l'eau, provoqué par ces derniers.

Il n'a pas été possible d'établir de comparaison directe entre les divers types de déflecteurs essayés, étant donné que l'orientation des déflecteurs n'a pas été maintenue constante sur toute la durée des essais.

Vitesse de déglaçage et efficacité des mélangeurs

La vitesse globale de déglaçage a été déterminée en mesurant sur les photographies aériennes les différences de superficie des zones déglacées.

Des mesures prises dans le bassin de chargement en cause et dans le port n'ayant révélé aucun amincissement de la couche de glace attribuable à des causes naturelles au cours de la période d'essai, l'épaisseur de la glace a été supposée uniforme et égale à 65 cm aux fins de calcul de la vitesse de déglaçage. Cela conduit à une sous-estimation de la vitesse de déglaçage car, en réalité, les canons entraînent en outre un amincissement de la glace.

La figure 4.4 fait la comparaison de la superficie déglacée par les trois systèmes essayés dans le port de Thunder Bay, soit les mélangeurs à canon pneumatique, les diffuseurs en

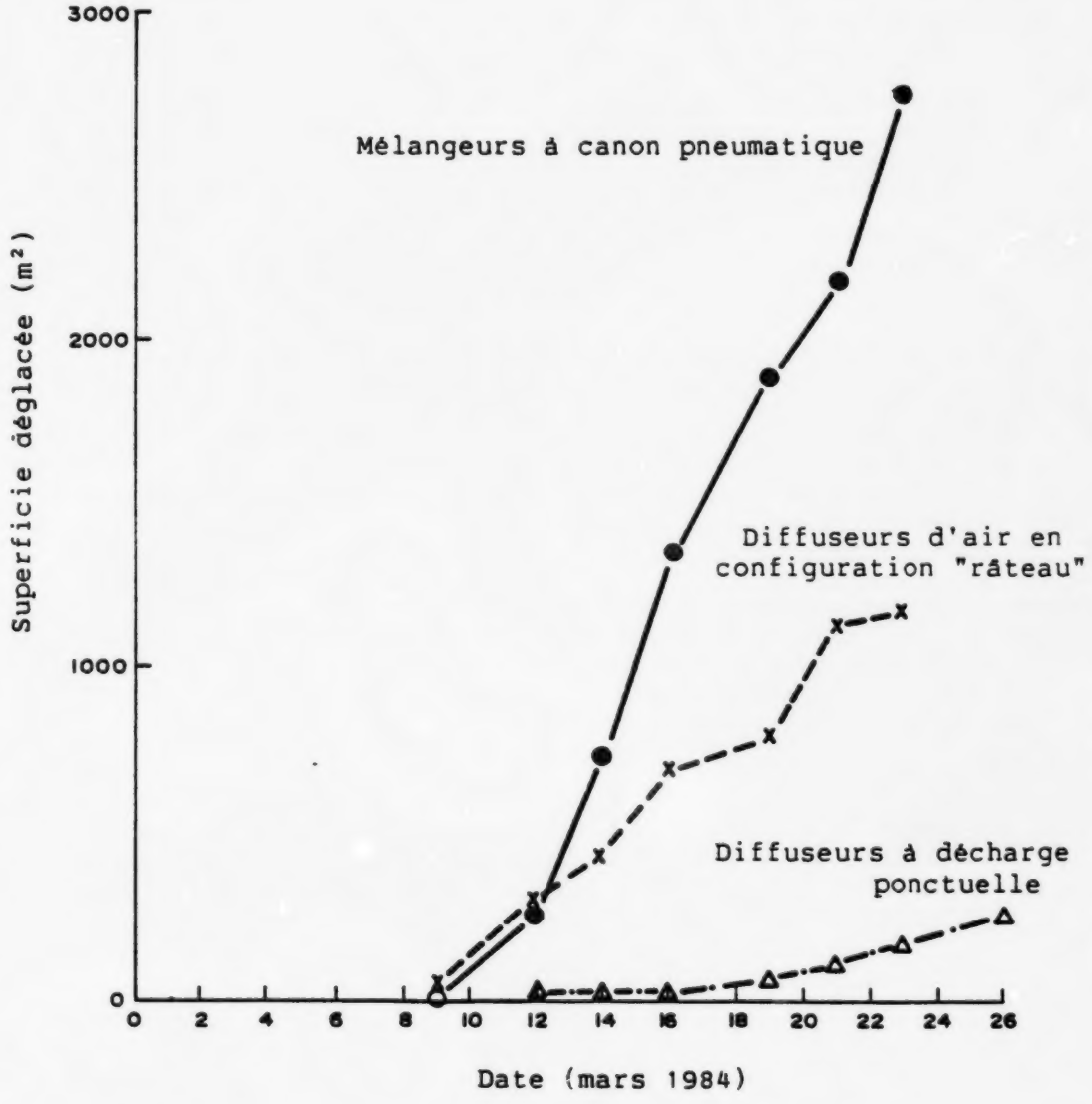


Figure 4.4 Comparaison de la superficie déglacée par les trois systèmes essayés dans le port de Thunder Bay en mars 1984

configuration râteau et ceux à décharge ponctuelle. Les mélangeurs à canon pneumatique sont incontestablement les plus efficaces tant par la superficie déglacée que par la vitesse de déglaçage, établie à 193 m^2/jour en moyenne.

Les diffuseurs en configuration râteau, bien qu'ils aient été maintenus en marche sur une plus longue période (depuis le 1er mars), ont déglacé une moins grande superficie que les mélangeurs à canon pneumatique. Leur vitesse moyenne de déglaçage a été calculée à moins de 82 m^2/jour, à compter du moment où les trous sont devenus visibles sur les photographies aériennes. Celle des diffuseurs à décharge ponctuelle était de 17,8 m^2/jour.

Le débit d'alimentation a été de 0,132 m^3/s sous une pression de 76 kPa pour les mélangeurs à canon pneumatique et de 0,040 m^3/s sous une pression de 690 kPa pour les diffuseurs en râteau. Le rendement respectif de ces deux systèmes a donc été de 0,017 et 0,23 m^2 de glace fondue par m^3 d'air utilisé. Néanmoins, les mélangeurs à canon pneumatique sont les plus efficaces en raison de leur consommation relativement faible d'énergie. En effet, ils étaient alimentés par un ventilateur de 20 HP, alors que les diffuseurs en râteau étaient alimentés par un compresseur de 40 HP. Pour les diffuseurs à décharge ponctuelle, le débit d'alimentation n'a pas été mesuré.

Comparaison des coûts

Une mise en comparaison des coûts d'acquisition, d'implantation, d'exploitation et d'entretien a révélé que les diffuseurs en configuration râteau sont plus économiques pour une période d'amortissement d'un an. Par contre, sur une période d'amortissement de cinq ans, les mélangeurs à canon pneumatique sont plus rentables.

4.2 Mesure de la poussée des glaces

Tous les essais visant à déterminer les forces exercées par les glaces sur les parois du bassin ont été effectués en utilisant un point zéro choisi arbitrairement. En effet, les variations thermiques de la glace étant à l'origine de charges considérables, le point zéro absolu n'était pas connu. On établissait donc le zéro environ cinq à dix minutes avant chaque essai, alors que le brise-glace était encore assez éloigné. Et tous les essais ont été effectués aussitôt que possible le matin, les charges d'origine thermique étant moins grandes à ce moment de la journée [13].

Le tableau 4.1 donne les résultats des essais. Les figures 4.5 à 4.10 illustrent la répartition des forces exercées sur les parois du bassin de même que la position du brise-glace et la configuration du chenal déglacé. Les lignes pointillées représentent la poussée maximum anticipée, calculée par interpolation et extrapolation à partir des valeurs observées.

Les valeurs enregistrées par les cinq capteurs de pression au cours du premier essai variaient largement. Le capteur n° 1, placé au bout du quai, n'a jamais indiqué plus de 15 kN/m durant tout le temps que le brise-glace avançait vers le bassin alors qu'en même temps les capteurs placés à l'intérieur du bassin enregistraient des pressions considérables. Les capteurs nos 2, 3 et 4, qui n'étaient pourtant disposés que sur une distance de 7,40 m, ont enregistré des valeurs sensiblement différentes. Sauf lors de la deuxième et de la huitième étape de l'essai, plus le capteur se trouvait loin du bout du quai plus la pression enregistrée était élevée. Cette tendance était prévisible en raison de l'inégale longueur des deux quais. Ainsi, lorsqu'une pression s'exerçait dans la couche de glace, sous l'effet soit de contraintes thermiques, soit de la pénétration du brise-glace, la poussée des glaces près du bout du quai de la Manitoba Pool n'était pas aussi forte qu'elle pouvait l'être à l'intérieur du bassin, du fait que la rigidité du quai opposé était sensiblement plus grande que celle de la glace non confinée de l'extérieur du bassin. On avait cru, en plaçant les capteurs de pression, que la pression maximum serait enregistrée par les capteurs nos 2 ou 3 et que celle enregistrée par le capteur n° 4 serait plus faible. Il semble, au contraire, que la poussée maximum s'exerçait au-delà du capteur n° 4. Elle n'a donc pas pu être mesurée. Une concentration de contraintes au voisinage du capteur n° 5 porte à croire que la poussée maximum exercée sur le quai de la Manitoba Pool serait inférieure à la valeur enregistrée par le capteur n° 5.

Bien que le capteur n° 5 ait été placé vis-à-vis du capteur n° 4, il a enregistré des pressions sensiblement plus grandes que ce dernier, soit 2,6 fois plus grandes en moyenne. Cette différence s'explique encore une fois par l'inégale longueur des deux quais. Comme il l'a déjà été dit, l'action des glaces à l'extrémité du quai de la Manitoba Pool n'est pas aussi confinée qu'à l'intérieur du bassin. La poussée exercée par les glaces doit provoquer une réaction pour que celles-ci restent en place. Le fait que le quai de la U.G.G.M. présente une moins grande zone de réaction explique qu'une plus grande pression ait été enregistrée sur ce quai. Les figures 4.5 et 4.6 illustrent les charges exercées parallèlement à la face des quais

ESSAI	ÉTAPE	PRESSION MAXIMUM					POSITION DU BRISE-GLACE
		HEXPACK N° 1 (kN/m)	HEXPACK N° 2 (kN/m)	HEXPACK N° 3 (kN/m)	HEXPACK N° 4 (kN/m)	HEXPACK N° 5 (kN/m)	
1	1	12,03	5,89	18,40	27,23	96,18	120 m à l'e.-s.-e. du quai
1	2	7,92	4,87	15,06	6,20	23,60	hors de portée
1	3	14,82	17,16	30,54	42,13	126,66	120 m à l'e.-s.-e. du quai
1	4	8,54	9,05	23,44	44,45	68,32	80 m à l'e.-s.-e. du quai
1	5	5,62	8,22	11,84	56,21	119,66	15 m à l'est du quai
1	6	BF*1	37,55	40,67	65,15	NF*2	75 m à l'est du quai
1	7	BF	36,54	38,64	72,27	131,53	60 m à l'est du quai
1	8	BF	22,04	12,35	74,76	183,49	45 m à l'est du quai
2	1	BF	65,00*3	125,00*3	25,49	NF	0 à 20 m - intérieur du bassin
2	2	BF	BF	50,00*3	41,55	NF	Arrêt 20 m - intérieur du bassin
3*4	1	NF	25,81	52,21	23,85	121,73	20 à 45 m - intérieur du bassin
3	2	42,58	24,52	36,13	23,10	141,85	45 à 70 m - intérieur du bassin
3	3	BF	8,99	85,10	30,60	113,11	100 à 145 m - intérieur du bassin
3	4	BF	BF	178,09	121,78	3,95	205 à 230 m - intérieur du bassin

*1 BF signifie que le capteur Hexpack s'est délogé.
*2 NF signifie un défaut de fonctionnement du capteur Hexpack, soit parce qu'il est débranché, soit en raison de trop fortes contraintes dans la glace.
*3 Valeurs actives.
*4 La disposition des capteurs de pression a été chargée pour le troisième essai.

Tableau 4.1 Résultats des essais visant à mesurer les forces exercées par les glaces

Essai n° 1 Étape n° 08

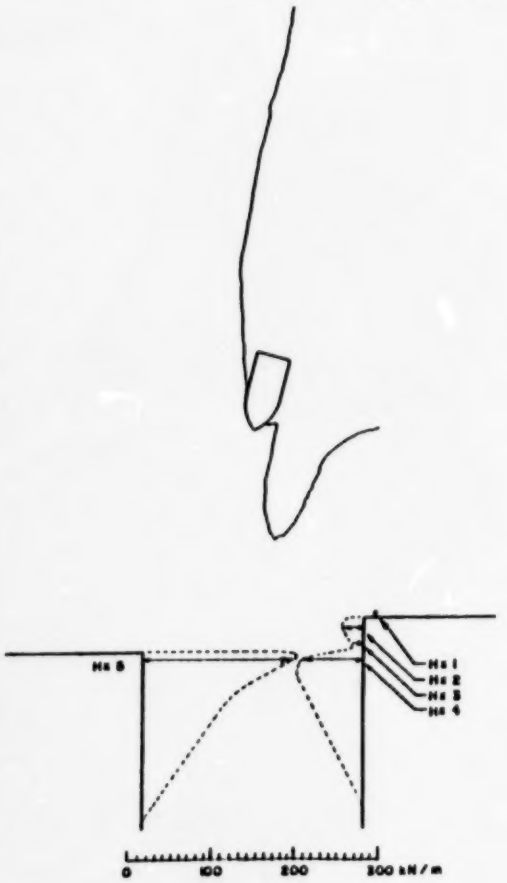


Figure 4.5

Répartition des forces exercées par les glaces

Essai n° 1 Étape n° 05

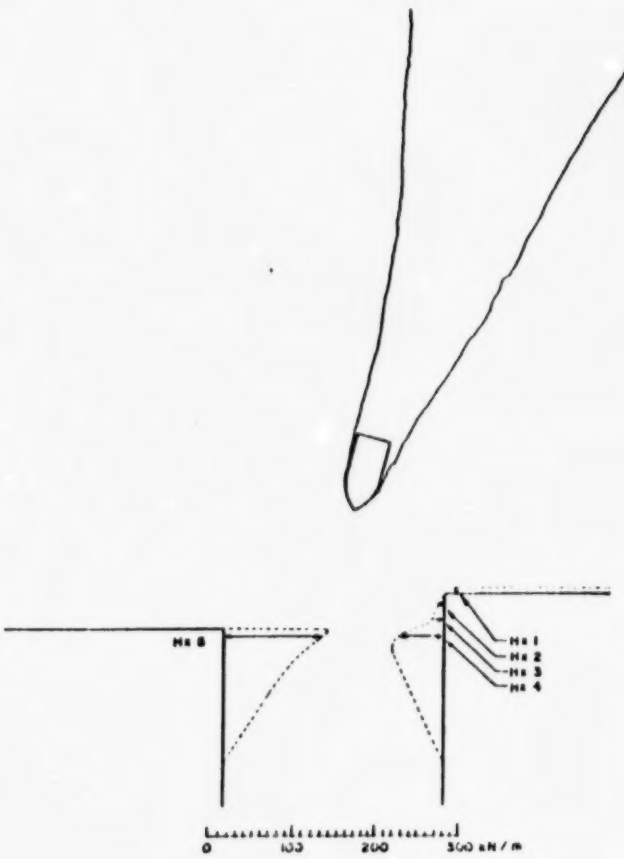


Figure 4.6

Répartition des forces exercées par les glaces

Essai n° 2 Étape n° 01

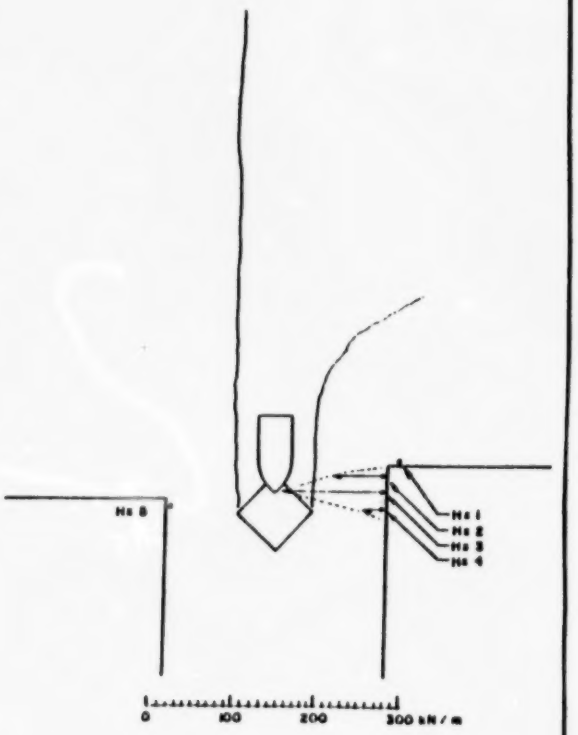


Figure 4.7

Répartition des forces exercées par les glaces

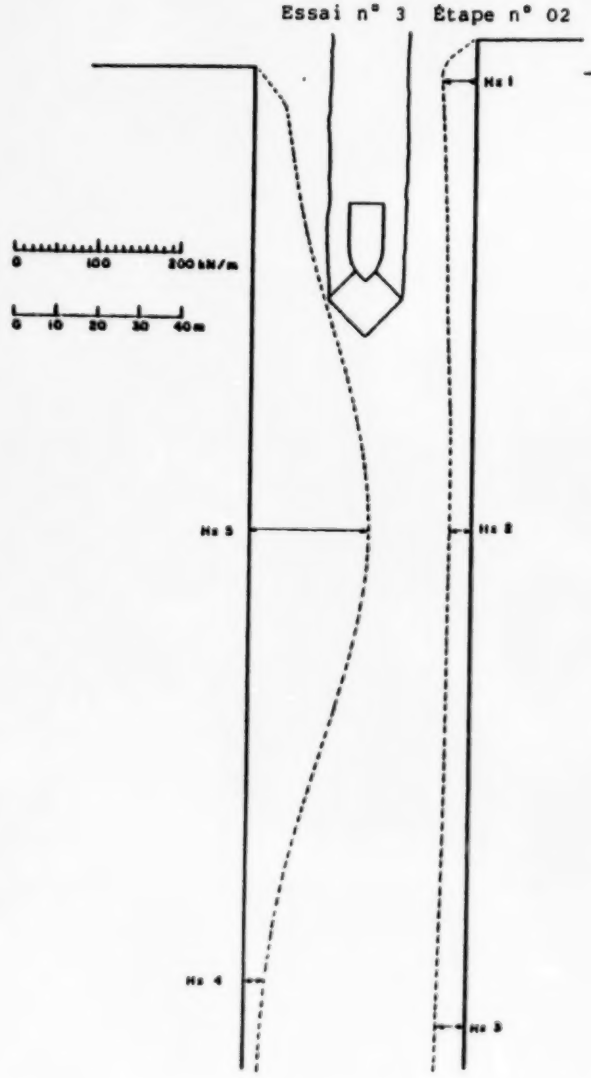


Figure 4.8
Répartition des forces exercées par les glaces

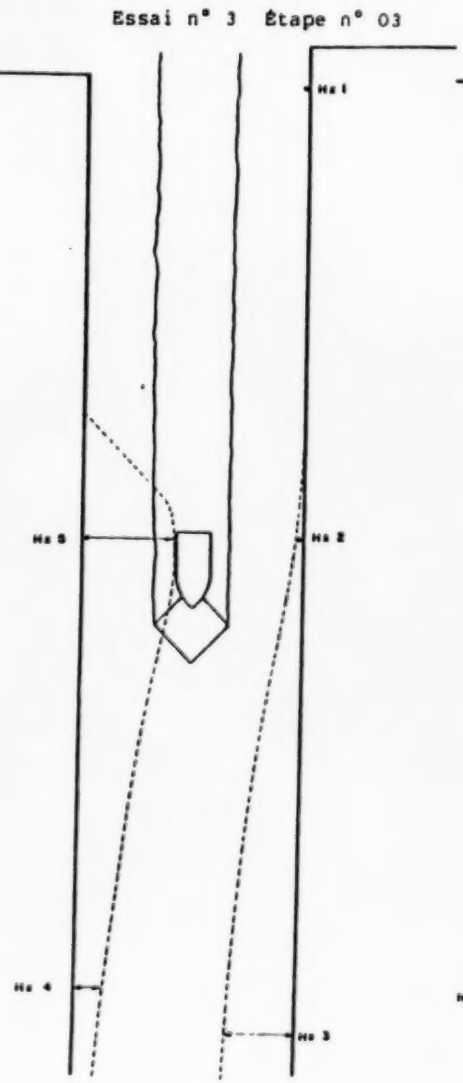


Figure 4.9
Répartition des forces exercées par les glaces

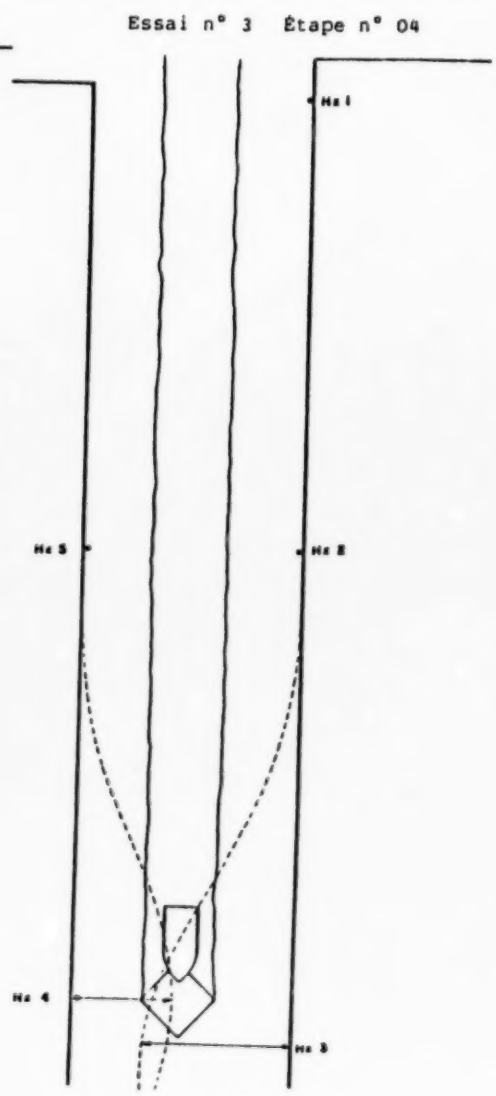


Figure 4.10
Répartition des forces exercées par les glaces

lorsque le brise-glace avance dans le port. Si on fait abstraction d'un léger effet de cisaillement au bout du quai de la U.G.G.M., les courbes de répartition des charges doivent circonscrire une superficie égale. On voit donc pourquoi la pression enregistrée au bout du quai de la U.G.G.M. est sensiblement plus élevée que celle enregistrée à la même distance sur le quai de la Manitoba Pool.

De façon générale, les pressions enregistrées augmentaient à mesure que le brise-glace approchait du bassin. La plus forte pression relevée au cours du premier essai a été enregistrée sur le quai de la U.G.G.M. et était égale à 183,5 kN/m. La plus forte pression exercée sur le quai de la Manitoba Pool a été enregistrée à peu près au même moment par le capteur n° 4; elle était de 74,8 kN/m. Comme le brise-glace n'est pas entré dans le bassin au cours de cet essai, on peut dire que les pressions enregistrées sont celles auxquelles les quais sont normalement soumis chaque année lors des opérations de déglaçage du port.

La figure 4.7 est typique des pressions enregistrées lorsque le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air est entré dans le bassin. Au deuxième essai, le brise-glace est parti du bord de la glace intacte et a pénétré jusqu'à environ 20 mètres à l'intérieur du bassin. Les pressions maximums enregistrées par les capteurs nos 2, 3 et 4 ont alors été respectivement de 65,0, de 125,0 et de 25,5 kN/m. On peut constater que, contrairement à ce qui s'était produit au cours du premier essai, la pression maximum a été enregistrée par le capteur n° 3.

La deuxième étape du deuxième essai se situe dans l'intervalle entre deux impacts successifs. Les pressions enregistrées à ce moment étaient moins fortes que lors de l'impact. Un fait intéressant a été constaté durant les essais mettant en oeuvre la plate-forme à coussin d'air; à plusieurs reprises, les capteurs ont enregistré une oscillation périodique dont la fréquence, égale à 1 Hz, était la même que celle de la variation de la pression du coussin d'air rapportée dans le document [12] de la bibliographie.

Les figures 4.8, 4.9 et 4.10 illustrent la répartition des charges enregistrées au cours du troisième essai. La première étape de l'essai concerne le moment où le brise-glace passe le capteur n° 1; les deuxième et troisième étapes, celui où le brise-glace approche, puis passe les capteurs nos 2 et 5; la quatrième étape, celui où le brise-glace passe les capteurs nos 3 et 4.

Les trois plus fortes pressions enregistrées au cours du troisième essai ont été de 178,1, 143,9 et 121,8 kN/m. La première et la dernière de ces valeurs ont été enregistrées respectivement par les capteurs nos 3 et 4 au moment où le brise-glace passait le milieu du bassin. La deuxième valeur a été enregistrée par le capteur n° 5 au moment où le brise-glace approchait du milieu du bassin. Les valeurs enregistrées par les accéléromètres n'ont jamais dépassé 0,01 g.

Charges thermiques

Les contraintes thermiques dans la glace ont été contrôlées durant une période de 36 heures s'étalant du 18 au 20 mars. La température de l'air et de la glace a également été contrôlée durant la même période. La température de la couche supérieure de la glace a varié entre -3,9 et -0,1 °C et celle de la couche inférieure entre -1,7 et -0,2 °C. Ce sont ces variations ainsi que la différence de température entre les diverses couches de la glace qui sont à l'origine des contraintes thermiques. Celles-ci ont été enregistrées par les capteurs de pression, dont les indications ont confirmé ce que Bomeng [13] avait déjà constaté, c'est-à-dire que les contraintes thermiques sont plus grandes dans les 30 cm du dessus de la couche de glace et qu'elles s'atténuent avec la profondeur. La figure 4.11 donne les pressions enregistrées par le capteur n° 2 du 18 mars 22 h au 20 mars 12 h. L'élément A était pratiquement sorti de la glace et n'a donc enregistré que de faibles pressions. Les éléments B, C et D, placés respectivement dans le tiers supérieur, au milieu et dans la couche inférieure de la glace, ont enregistré des pressions moins fortes l'un par rapport au précédent. Le plus grand écart de pression a été enregistré par l'élément B, dont les indications ont varié entre +50 et -275 kPa. Ces contraintes représentent une force de +100 à -300 kN/m contre les quais et correspondent à une variation plutôt faible de la température atmosphérique.

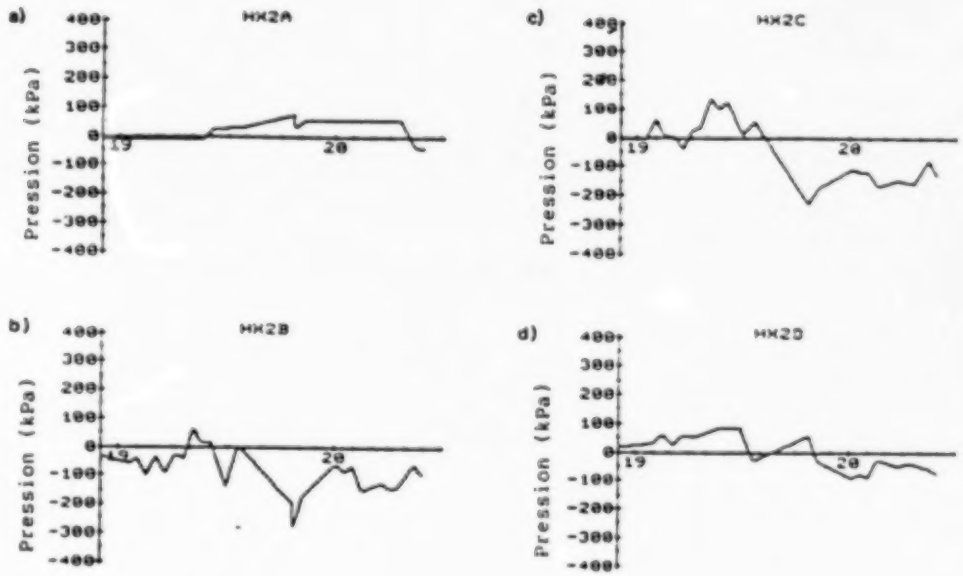


Figure 4.11 Variations de pression en fonction des variations thermiques de la glace

5. CONCLUSIONS

5.1 Mélangeurs à canon pneumatique

Les mélangeurs à canon pneumatique se sont avérés très efficaces à mélanger une colonne d'eau de température non uniforme. En effet, on a obtenu ce résultat dès la première journée de leur mise en exploitation. De plus, ils ont créé une circulation horizontale à la surface qui entraînait l'eau jusqu'à une distance d'au moins 48 m.

Le potentiel thermique de l'eau du bassin ne suffisait, en principe, à faire fondre que 17 p. 100 de la glace. Or, le volume de glace fondue dépassait largement ce pourcentage et, par surcroît, le potentiel thermique de l'eau du bassin a augmenté au cours de la période d'essai. Ces constatations ont permis de tirer deux conclusions importantes: premièrement, il a dû y avoir un apport de chaleur dans le bassin, provenant de quelque source naturelle, avant les opérations de déglaçage; deuxièmement, la température initiale de l'eau dans le bassin n'a pas ralenti l'action des mélangeurs essayés.

On a constaté, pour les mélangeurs à canon pneumatique, une vitesse moyenne de déglaçage égale à 193 m^2/jour, donc plus de deux fois supérieure à celle des diffuseurs en configuration râteau essayés dans le même bassin. De plus, le rythme de déglaçage était plus régulier dans le premier que dans le deuxième cas.

Les mélangeurs à canon pneumatique se sont avérés plus efficaces que les diffuseurs en configuration râteau. En effet, les ventilateurs basse pression (20 HP) qui ont servi à alimenter les premiers utilisaient deux fois moins d'énergie que les compresseurs haute pression (40 HP) utilisés pour les deuxièmes. De plus, ils ont exigé un entretien en service moins fréquent que ces derniers.

Enfin, ils sont plus économiques sur une période d'amortissement de cinq ans que les deux autres systèmes.

5.2 Poussée des glaces

(1) La force maximum admissible en tout point du quai a été calculée à 365 kN/m.

(2) La force maximum due à la dilatation thermique de la glace s'est située entre 300 et -100 kN/m.

(3) La poussée exercée par les glaces lorsque le brise-glace approchait du bassin a atteint 184 kN/m (premier essai). Cette valeur a été jugée excessive et l'essai mettant en oeuvre le brise-glace seul a été interrompu.

(4) La poussée maximum enregistrée lorsque le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air a pénétré jusqu'à environ 25 m à l'intérieur du bassin (deuxième essai) était de 125 kN/m. La glace n'étant plus brisée par la plate-forme mais par la proue du brise-glace, l'essai a été discontinué.

(5) La poussée maximum enregistrée lorsque le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air est entré jusqu'au fond du bassin (troisième essai) était de 178 kN/m.

(6) Les forces exercées par les glaces sur les parois du bassin au cours des opérations de déglaçage étaient considérables. Elles risquent de dépasser la valeur maximum admise lorsqu'elles s'ajoutent à l'effet des contraintes thermiques dans la glace. Ces dernières atteignent leur valeur maximum lorsque la température de la glace augmente brusquement.

(7) Il existe des méthodes empiriques et analytiques qui permettent d'estimer avec assez d'exactitude les pressions exercées sur les structures entourant les voies de navigation. Les brise-glace de type classique ne doivent pas être employés seuls pour le déglaçage des bassins de chargement du port de Thunder Bay, le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air ayant fait la preuve d'une plus grande efficacité. D'autres types de brise-glace qui avancent en écrasant la glace sous leur poids peuvent également être utilisés.

6. RECOMMANDATIONS

6.1 Mélangeurs à canon pneumatique

(1) Des mélangeurs à canon pneumatique devraient être utilisés pour le déglaçage des bassins de chargement du port de Thunder Bay.

(2) Une étude devrait être faite sur la possibilité de modifier la conception des mélangeurs ou leur disposition pour faciliter leur mise en place et leur retrait.

(3) L'étude comparative des divers types de déflecteurs devrait être reprise.

(4) Les coûts des systèmes de mélangeurs à canon pneumatique, des diffuseurs en configuration "râteau" et des diffuseurs classiques devraient être comparés sur la base de conditions d'exploitation uniformes.

(5) Une étude à long terme devrait être entreprise pour enregistrer les différences du potentiel thermique de l'eau d'un bassin à l'autre et d'une année à l'autre, pour voir dans quelle mesure ce potentiel pourrait être utilisé aux fins du déglaçage.

6.2 Poussée des glaces

(1) Les brise-glace de type classique ne doivent pas être employés seuls pour le déglaçage des bassins de chargement du port de Thunder Bay.

(2) Le tandem brise-glace/plate-forme à coussin d'air s'est avéré efficace et peut être utilisé sans danger dans les bassins portuaires. D'autres types de brise-glace qui agissent en écrasant la glace sous leur poids pourraient également être utilisés.

(3) Les pressions exercées sur les structures entourant les voies de navigation devraient être étudiées par des méthodes empiriques ou analytiques. On peut, par exemple, placer des capteurs de pression dans la glace pour mesurer les forces exercées au passage d'un navire.

(4) Les essais in situ coûtent cher; ils devraient être complétés par des essais en laboratoire visant à déterminer le rôle des paramètres suivants:

- épaisseur de la glace,
- caractéristiques de la glace,
- distance entre le navire et les structures fixes,
- rigidité des structures,
- forme des structures,
- vitesse d'avancement du navire,
- forme de la proue, et
- contraintes thermiques.

(5) Les résultats obtenus en laboratoire devraient être comparés à ceux obtenus in situ, y compris ceux de la présente étude, ainsi qu'aux résultats des calculs par la méthode des éléments finis. Cette comparaison devrait permettre de comprendre les mécanismes d'action des forces s'exercant, au passage des navires, sur les structures qui entourent les voies de navigation.

7. RÉFÉRENCES

[1] Abdelnour, R., M. Perchanok et D. Howard, Ice Management in Thunder Bay Harbour - Winter 1984; Volume I - Cannon Bubbler Experiments, rapport fait par Arctec Canada Limited pour le Centre de développement des transports de Transports Canada, 1984, TP 5835E.

[2] Abdelnour, R., M. Perchanok et D. Howard, Ice Management in Thunder Bay Harbour - Winter 1984; Volume II - Cannon Bubbler Experiments, rapport fait par Arctec Canada Limited pour le Centre de développement des transports de Transports Canada, 1984, TP 5835E.

[3] Hill, J.E., Air Bubbler Ice Control Experiment in Thunder Bay, Commission du port Lakehead, rapport fait pour la direction Recherche et Développement de Transports Canada, mai 1980, TP 2657.

[4] Kamo, H.R. et D.A. Nelson, Air Bubbler Ice Control Experiments in Thunder Bay, Ontario, rapport fait par V.B. Cook Company Limited pour le Centre de développement des transports, au nom de la Commission du port Lakehead, mai 1982, TP 3797E.

[5] Kamo, H.R. et D.A. Nelson, 1982-83 Air Bubbler Ice Control Experiments in Thunder Bay, Ontario, rapport fait par V.B. Cook Company Limited pour le compte de la Commission du port Lakehead et de Transports Canada, juillet 1983, TP 4790E.

[6] Murphy, D., De-Icing Experiments Using Atara Cannon Mixers at Canadian Malting Terminal, Thunder Bay, rapport fait par Atara Corporation pour le compte du Centre de développement des transports de Transports Canada, avril 1982, TP 3706E.

[7] Abdelnour, R., Field Temperature Measurement in Thunder Bay Harbour (Winter 1983), rapport fait par Arctec Canada pour le Centre de développement des transports de Transports Canada, juin 1983, TP 4517E.

[8] Gill, R.J. et A.B. Cammaert, Ice Control for Arctic Ports and Harbours, rapport fait pour le Centre de développement des transports de Transports Canada, janvier 1983, TP 3967.

[9] Abdelnour, R., et M. Sayed, Technological Alternatives to the Use of the CCGS Icebreakers at Thunder Bay Harbour, rapport fait par Arctec Canada Limited pour Transports Canada, juillet 1982.

[10] Ashton, G.D., Theory of Thermal Control and Prevention of Ice in Rivers and Lakes, Advances in Hydroscience (13), 1982.

[11] Andersen, P.F., Surface Agitation in Ice Prone Waters, POAC 81, Québec, 1981.

[12] Dubois, J., Abdelnour, R., et Daley, C., Testing and Evaluation of the ACIB in Thunder Bay Harbour, rapport fait par Arctec Canada Limited pour le Centre de développement des transports, mars 1983, TP 4083E.

[13] Bomeng, X., Pressure Due to Expansion of Ice Sheet in Reservoirs, symposium de l'IAHR, Québec, 1981.